

SIMULATION OF CAVITATING JET OUTFLOW ONTO BIOFOULING OF SHIPBUILDING STEEL SURFACE

A. I. Ukolov, V. P. Rodionov

Kerch State Maritime Technological University, Kerch, Russian Federation

*An experiment on fouling the surface of shipbuilding steel of A40S grade in the natural marine conditions of the Kerch Strait is carried out. After being under the water for 8 months (August-March), overgrowths of the following groups are found: sessile polychaete worms - *Serpula* (*Serpula vermicularis*), *balanus* (*Chthamalus stellatus*), bryozoa (*Bryozoa*) and green algae (*Chlorophyta*). Measurement of their strength characteristics has showed that the fundamental difficulties at cleaning the vessel hull are caused by the fouling with *balanus*, the fracture threshold pressure of which depending on its size and density on the surface is 5-25 MPa. To implement underwater cleaning with a submerged jet at lower pressures, the use of the simultaneous action of a dynamic and cavitation effect has been proposed. Numerical simulation of the outflow of fluid into the flooded space through a 30 mm long nozzle consisting of a tapered truncated cone with 20 mm height and an imaginary angle at the vertex of 20° and expanding with 10 mm height with an angle of 10° has revealed areas of the maximum vapor phase fraction on the surface of the fouling model, and its relationship with absolute pressure distribution. These parameters depend on the jet orientation and the distance to the obstacle, made in the form of a hemisphere, due to the internal structure of the cavitating jet, which in the cross section has a different concentration of gas-vapor bubbles. When the jet flows perpendicular to the fouling plane, the vapor phase concentration has a maximum at the edges of the hemispherical barrier, which are smoothed with increasing distance from the cavitator cutoff to the fouling model. The inclination of the jet by 45° from the perpendicular direction leads to an increase in the cavitation effect. The maximum vapor phase shifts in the opposite direction from the location of the nozzle, and has a sharp decline at the leading edge of fouling. The study is aimed at improving the cleaning process of the underwater part of the hull, using economical and small-sized installations.*

Keywords: submerged jet, nozzle, cavitation, fouling, shipbuilding steel, pressure, destruction, modeling.

For citation:

Ukolov, Aleksey I., and Victor P. Rodionov. "Simulation of cavitating jet outflow onto biofouling of shipbuilding steel surface." *Vestnik Gosudarstvennogo universiteta morskogo i rechnogo flota imeni admiral S. O. Makarova* 11.6 (2019): 1096–1106. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1096-1106.

УДК 532.5

МОДЕЛИРОВАНИЕ ИСТЕЧЕНИЯ КАВИТИРУЮЩЕЙ СТРУИ НА БИООБРАСТАНИЕ ПОВЕРХНОСТИ СУДОСТРОИТЕЛЬНОЙ СТАЛИ

А. И. УКОЛОВ, В. П. РОДИОНОВ

ФГБОУ ВО «Керченский государственный морской технологический университет»,
Керчь, Российская Федерация

*Выполнен эксперимент по обрастанию поверхности судостроительной стали марки А40S в естественных морских условиях Керченского пролива. После нахождения под водой в течение восьми месяцев (август–март) выявлены обрастатели следующих групп: сидячие многощетинковые черви — серпулы (*Serpula vermicularis*), баянусы (*Chthamalus stellatus*), мианки (*Bryozoa*) и зеленые водоросли (*Chlorophyta*). Измерение их прочностных характеристик показало, что основные трудности при очистке корпуса судна вызваны обрастанием баянусом, пороговое давление разрушения которого в зависимости от его размера и плотности на поверхности составило 5–25 МПа. Для реализации подводной очистки затопленной струей при более низких давлениях предложено использование одновременного действия динамического и кавитационного эффекта. Численное моделирование истечения жидкости в затопленное пространство через сопло длиной 30 мм, состоящее из сужающегося усеченного конуса высотой 20 мм и мнимым углом у вершины 20° и расширяющегося высотой 10 мм с углом 10°, выявило области максимальной доли паровой фазы на поверхности модели обрастания и ее связь с распределением абсолютного давления. Эти параме-*

тры зависят от ориентации струи и расстояния до преграды, выполненной в виде полусферы, что обусловлено внутренней структурой кавитирующей струи, которая в сечении имеет различную концентрацию газопаровых пузырьков. При истечении струи перпендикулярно плоскости с обрастанием концентрация паровой фазы имеет максимум по краям полусферической преграды, которые сглаживаются с увеличением расстояния от среза кавитатора до модели обрастания. Наклон струи на 45° от перпендикулярного направления приводит к усилению кавитационного влияния. Максимум паровой фазы сдвигается в противоположную сторону от расположения сопла и имеет резкий спад на переднем крае обрастания. Выполненное исследование направлено на усовершенствование процесса очистки подводной части корпуса судна с использованием экономичных и малогабаритных установок.

Ключевые слова: затопленная струя, сопло, кавитация, обрастание, судостроительная сталь, давление, разрушение, моделирование.

Для цитирования:

Уколов А. И. Моделирование истечения кавитирующей струи на биообрастание поверхности судостроительной стали / А. И. Уколов, В. П. Родионов // Вестник Государственного университета морского и речного флота имени адмирала С. О. Макарова. — 2019. — Т. 11. — № 6. — С. 1096–1106. DOI: 10.21821/2309-5180-2019-11-6-1096-1106.

Введение (Introduction)

Соппротивление корпуса имеет первостепенное значение для судов, поскольку напрямую влияет на их скорость, мощность и расход топлива. Лучшим способом для уменьшения сопротивления вязкого трения является применение обработки корпуса судна для того, чтобы минимизировать его физическую и биологическую шероховатость. Физическая шероховатость может быть сведена к минимуму путем применения определенных профилактических мер, но биологическое загрязнение труднее контролировать. Биообрастание имеет три основных отрицательных эффекта, которые включают в себя увеличение сопротивления и потребления топлива, нанесение ущерба пленкам краски и перенос чужеродных видов, угрожающих биологическому разнообразию [1]–[3]. Уровень загрязнения зависит от нескольких факторов, включая период времени, проведенного в море, температуру воды, географическое положение судна, условия на поверхности и соленость моря. Обрастание начинает происходить сразу после погружения в воду и продолжается в течение всего периода эксплуатации судна в море до тех пор, пока не будет выполнен процесс очистки.

Усовершенствовать процесс подводной очистки можно с применением кавитационного эффекта. Кавитация — это физическое явление, которое происходит в жидкости, когда величина статического давления становится ниже некоторого порогового значения. Явление кавитации характеризуется образованием кавитационных пузырьков. По мере того как пузырьки разрушаются вблизи твердой стены, энергия удара может вызвать эрозию поверхности [4]–[6]. Кавитационная эрозия встречается в морской, гидравлической и экологической технике. Специалистам пока еще неизвестны материалы, способные противостоять воздействию кавитации [4], [7], [8].

Основные проблемы широкого использования кавитации в струйном потоке жидкости связаны с тем, что это не всегда управляемый и прогнозируемый процесс. Результат кавитационного воздействия на поверхность зависит от гидродинамических характеристик течения жидкости, геометрии и качества изготовления кавитатора [9]. Детальный экспериментальный анализ струйной кавитации ограничен производительностью насосных аппаратов и невозможностью испытаний множества различных комбинаций геометрии сопла или насадки. Ускорить исследование гидродинамической кавитации позволяет компьютерное моделирование струйного истечения (Computational Fluid Dynamics-CFD).

Моделирование CFD в последнее время вызвало значительный интерес и является важным инструментом для изучения эффекта обрастания и защиты от обрастания. Благодаря CFD исследована сила подъема и сопротивления морских подводных устройств с обрастающим и противообрастающим покрытием [10], выполнен прогноз влияния биообрастания на сопротивление судна [11], [12] и на характеристики гребных винтов [13].

Цель данной работы — исследовать процесс взаимодействия кавитирующей струи с биологическими обрастаниями, свойственными теплым морям.

Методы и материалы (Methods and Materials)

Задача проведения эксперимента в морских условиях заключалась в получении количественных данных для последующего численного моделирования. В эксперименте использовали судостроительную сталь марки А40S, пластины размером $4 \times 100 \times 250$ мм, одна сторона которых была окрашена двухкомпонентной акрил-уретановой эмалью с предварительной грунтовкой металла, другая — оставалась необработанной после проката. На специальном держателе образцы в три ряда были погружены в морскую воду на базе «КГМТУ» в районе Керченского пролива. Расстояние от уровня моря до первого ряда — 1 м, между рядами — 0,3 м. Продолжительность эксперимента — 8 месяцев (август – март).

На первом этапе механическое воздействие на обрастания было выполнено затопленной кавитирующей струей давлением 10 атм на входе в насадок диаметром 4 мм (рис. 1, а). На втором этапе испытание обрастания на прочность осуществлялось путем нагружения гетинаксовым цилиндром, сопряженным с аналоговым динамометром марки NK-500 (рис. 1, б). Размер указан в мм. В режиме «реак» динамометр фиксировал максимальную силу разрушения обрастания при сжатии перпендикулярно поверхности и под углом 45° .

Подробное исследование влияния кавитирующего потока выполнено методом конечно-элементного моделирования в программном комплексе ANSYS Workbench 19.1 (академическая лицензия). Модуль ANSYS CFX, интегрированный в расчетную среду ANSYS Workbench, является мощным инструментом для анализа в области вычислительной динамики жидкости, в том числе с учетом кавитации. Количественной характеристикой кавитации потока является число кавитации, определяемое следующим образом:

$$\chi = \frac{2(p - p_v)}{\rho_f v^2}, \quad (1)$$

где p — эталонное давление для потока (абсолютное давление CFD-решателя); p_v — давление насыщенного пара для жидкости при данной температуре; ρ_f — плотность жидкости; v — скорость потока.

Очевидно, что тенденция к кавитации потока увеличивается с уменьшением числа кавитации. В CFX модель Рэлея – Плессета реализована в многофазной структуре как модель межфазного массопереноса.

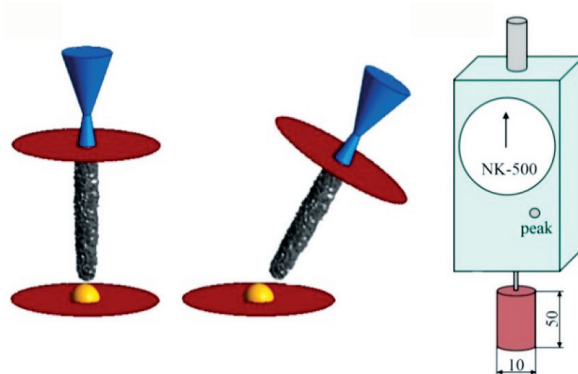


Рис. 1. Геометрия модели и направление кавитирующей струи (а); устройство измерения силы разрушения (б)

Уравнение Рэлея – Плессета, описывающее динамику осцилляций газопарового пузырька, его рост в жидкости и фазу сжатия, определяется выражением

$$R_B \frac{d^2 R_B}{dt^2} + \frac{3}{2} \left(\frac{dR_B}{dt} \right)^2 + \frac{2\sigma}{\rho_f R_B} = \frac{p_v - p}{\rho_f}, \quad (2)$$

где R_B — радиус пузырька; σ — коэффициент поверхностного натяжения между жидкостью и паром.

Уравнение (2) является следствием механического баланса при условии отсутствия тепловых барьеров для роста пузырьков. Пренебрегая членами второго порядка и поверхностным натяжением, это уравнение сводится к следующему:

$$\frac{dR_B}{dt} = \sqrt{\frac{3}{2} \frac{p_v - p}{\rho_f}}. \quad (3)$$

Скорость изменения объема пузырьков выглядит следующим образом:

$$\frac{dV_B}{dt} = \frac{d}{dt} \left(\frac{4}{3} \pi R_B^3 \right) = 4 \pi R_B^2 \sqrt{\frac{3}{2} \frac{p_v - p}{\rho_f}}, \quad (4)$$

а скорость изменения массы пузырьков составляет

$$\frac{dm_B}{dt} = \rho_v \frac{dV_B}{dt} = 4 \pi R_B^2 \rho_v \sqrt{\frac{3}{2} \frac{p_v - p}{\rho_f}}, \quad (5)$$

где ρ_v — плотность пара.

Если N_B — число пузырьков на единицу объема, то объемная доля r_v может быть выражена в виде

$$r_v = V_B N_B = \frac{4}{3} \pi R_B^3 N_B \quad (6)$$

и общая скорость межфазного массопереноса на единицу объема составляет

$$\dot{m}_{fv} = N_B \frac{dm_B}{dt} = \frac{3 r_v \rho_v}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{p_v - p}{\rho_f}}. \quad (7)$$

Это выражение получено на основе предположения о росте пузырьков (испарении). Добавив конденсацию пара, можно обобщить следующим образом:

$$\dot{m}_{fv} = F \frac{3 r_v \rho_v}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{|p_v - p|}{\rho_f}} \operatorname{sgn}(p_v - p), \quad (8)$$

где F — эмпирический фактор, который отличается для конденсации и испарения, рассчитанный с учетом того, что процессы могут происходить с разной скоростью (конденсация обычно намного медленнее, чем испарение).

В целях моделирования радиус пузырька R_B заменен на радиус области нуклеации $R_{\text{нукл}}$. Выражение (8) обобщено для испарения, но в случае конденсации, оно требует дальнейшей модификации. Испарение начинается на локальных «зародышах», чаще всего на стадии неконденсирующихся газов. Когда объемная доля пара увеличивается, их плотность должна, соответственно, уменьшаться, поскольку там меньше жидкости. Для парообразования, r_v в (8) заменяется $r_{\text{нукл}}(1 - r_v)$. Тогда

$$\dot{m}_{fg} = F \frac{3 r_{\text{нукл}} (1 - r_g) \rho_g}{R_B} \sqrt{\frac{2}{3} \frac{|p_v - p|}{\rho_f}} \operatorname{sgn}(p_v - p), \quad (9)$$

где $r_{\text{нукл}}$ — объемная доля мест нуклеации.

Для построения геометрии сопла и области истечения струи выбрана программа Design Modeler, интегрированная в комплекс ANSYS Workbench 19.1. Сопло длиной $l = 30$ мм состоит из сужающегося усеченного конуса высотой 20 мм с мнимым углом у вершины 20° и расширяющегося — высотой 10 мм с углом 10° (см. рис. 1, а). Диаметр проходного отверстия — 2,5 мм. Истечение выполнено в затопленном пространстве на преграду в форме полусферы радиусом 5 мм. Направление потока перпендикулярно и под углом 45° к плоскости основания полусферы. Расстояние от среза сопла до центра основания полусферы изменялось в интервале 5–12 см. Сеточная модель, сгенерированная тетраэдрического типа, состояла из 1,35 млн элементов и 240 тыс. узлов с дополнительным сгущением ячеек на плоскости полусферы. Уменьшение размеров элементов сетки на 30 % приводило к разбросу данных $\pm 0,4$ %.

Решение задачи в CFX – Solver, основанное на конечно-объемном методе, проходило в два этапа. На первом этапе было получено сошедшееся решение с выключенной моделью кавитации, затем полученные данные импортировались в продублированный CFX-решатель, и выполнялся анализ кавитирующей струи. Начало формирования задачи в препроцессоре CFX связано с заданием материала тела основного домена и опорного давления. Для этого во вкладке «Основные настройки» (Basic Settings) выбрана вода (Material — Water) и Reference Pressure — 0,1 МПа. Особенности процесса течения жидкости, указанные во вкладке «Fluid Models», соответствуют однородной несжимаемой жидкости при изотермических условиях истечения. Температура жидкости — 25 °С. Модель турбулентности потока выбрана Shear Stress Transport (SST). SST модель хорошо рассчитывает течения как вблизи стенки, так и в остальном потоке. Она стабильна и не требует больших вычислительных ресурсов [14]. Параметры входа (Inlet) заданы в окне «Mass and Momentum», массовый расход (Bulk Mass Flow Rate) — 0,2–0,3 кг/с, статическое давление (Static Pressure) выхода (Outlet) — 0,2 МПа.

Для анализа кавитационных характеристик струи на панели «Details of Default Domain in Flow Analysis» во вкладке «Основные настройки» («Basic Setting») в поле определения жидкости и газа («Fluid and Particle Definition») добавлена область «Vapour». Материалом выбран водяной пар при 25 °С (Water Vapour at 25 °С), модель жидкости (Fluid Models) однородная (Homogeneous). Кавитация задана на вкладке «Модели жидкости и пара» («Fluid pair Models»), опция — Cavitation. Во входном сечении Inlet определена объемная доля воды (Water-1) и пара (Vapour-0). Основной диаметр пузырьков пара (Main Diameter) в уравнении Рэлея – Плессета выбран $2 \cdot 10^{-6}$ м, давление насыщенных паров (Saturation Pressure) с учетом температуры моделируемой жидкости 25 °С — $p_v = 3170$ Па. Остальные параметры моделирования, выбранные по умолчанию, считаются стандартными для большинства кавитирующих течений. Для анализа динамического и кавитационного воздействия получено распределение абсолютного давления и объемной доли паровой фазы на поверхности полусферы и вдоль линии сечения ее плоскостью с использованием функции Polyline (350 точек).

Результаты (Results)

В результате нахождения под водой на пластинах обнаружены следующие типы обрастаний: сидячие многощетинковые черви — серпулы (*Serpula vermicularis*) размером 4–12 мм с плотностью одна-две особи на 1 см², баянусы (*Chthamalus stellatus*) с диаметром домика 5–10 мм и высотой 3–5 мм (рис. 2), мшанки (*Bryozoa*) и зеленые водоросли (*Chlorophyta*).

Гидродинамическим способом, при пониженном входном давлении (до 10 атм), площадь пластин очищалась от всех типов обрастания, кроме баянуса. Этот вид — один из наиболее распространенных [10] и трудно удаляемых с корпуса судна обрастателей. Являясь разновидностью усоногих раков, баянус имеет твердую известковую ракушку, которая прикрепляется к подложке при помощи специального вещества, выдерживающего нагрев до +177 °С, замораживание до –146 °С, не трескается, не отшелушивается, не растворяется ни кислотами, ни щелочами, ни органическими растворителями.

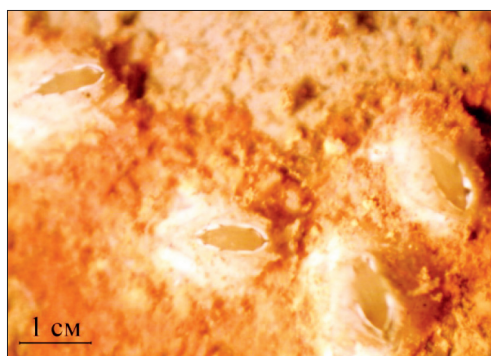


Рис. 2. Обрастание баянусом (*Chthamalus stellatus*) поверхности судостроительной стали марки А40S

При нормальном действии силы гетинаксового цилиндра результаты имели незначительный разброс и в основном зависели от размера обрастания. Для особей диаметром 4–10 мм (20 экз.) — рис. 3, эксперимент № 1 — интервал сил F составил 80–150 Н на двух типах исследуемых поверхностей. При сдвиговом воздействии F под углом 45° разрушения баянуса такого же размера (25 экз.) попадала в диапазон 25–75 Н (рис. 3, эксперимент № 2).

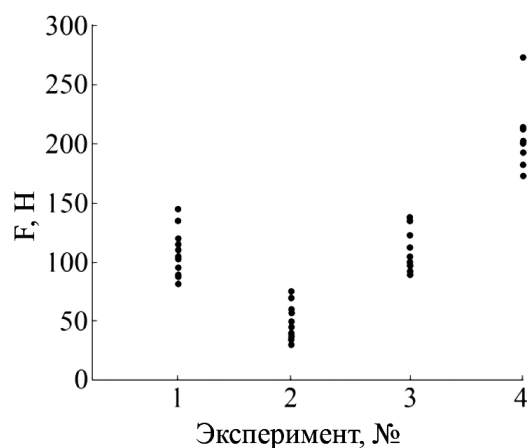


Рис. 3. Зависимость силы разрушения от способа нагружения и размеров обрастания

Снижение предельной силы можно объяснить структурой ракушки, которая состоит из сходящихся в домик пластинок. Нагрузка под углом приводит к их поочередному разрушению, для которого требуется меньшая сила, в отличие от перпендикулярного сжатия, где сила одновременно распределится на все пластины баянуса. Значение силы разрушения зависит от плотности баянуса на поверхности образца. Для отрыва двух близкорасположенных раковин она возрастает до 135 Н (15 экз.) — рис. 3, эксперимент № 3, а если речь идет об образовавшейся колонии из 3–4 экз. (см. рис. 1), то приложенная сила могла достигать 275 Н (10 экз.) — см. рис. 3, эксперимент № 4.

Давление, оказанное на оболочку в момент разрушения, составляет $p = 5\text{--}25$ МПа, что повышает требования к высоконапорным установкам для реализации подводной очистки судна. Проведенные исследования [4], [5] кавитационной эрозии неметаллических материалов в этом диапазоне давлений позволили получить экспериментальные зависимости глубины зоны эрозии h от времени τ воздействия на образец для различных значений давлений p_{in} . В диапазоне изменения времени воздействия струи на образец от 10 до 60 с зависимость $h = f(\tau)$ изменяется с достаточным приближением к линейному закону. С увеличением p_{in} тангенс угла наклона линейных зависимостей возрастает. Аналитическое выражение $h = f(\tau)$ для расстояния до преграды $l = 5$ см получено в виде

$$h = \frac{p_{in}}{10,4} \tau, \quad (10)$$

где p_{in} — давление на входе в сопло, МПа; h — глубина эрозии, см.

Использование как динамического, так и кавитационного эффекта позволяет снизить входное давление, а, следовательно, и энергозатратность насосных установок. Численный расчет выявил следующие закономерности кавитационного и силового действия струйного потока на модель обрастания. Концентрация паровой фазы в перпендикулярном поверхности потоке (см. рис. 1, а) жидкости имеет максимум по краям полусферической преграды, значение которого повышается при изменении расхода через сопло от 0,2 до 0,3 кг/с (на рис. 4, а и б обозначено 1, 2). Промежуточные расчеты с шагом 0,01 кг/с в этом интервале показали качественное сходство полученных кривых 1 и 2 на рис. 4, а. Однако рост паровой фазы на поверхности модели обрастания неравномерный и носит колебательный характер при малых изменениях расхода с общей тенденцией

к увеличению кавитационных пузырьков в исследуемой области. Это связано с вероятностным расчетом зарождения и роста пузырьков, что подтверждает вибрационное действие кавитирующей струи, которое усиливает эрозию хрупких материалов. Полное давление на входе в сопло соответствовало $p_i = 7,6$ атм при массовом расходе $0,2$ кг/с и $p_i = 18,2$ атм для $0,3$ кг/с. Величины таких порядков позволяют получить большинство коммерчески реализуемых напорных установок.

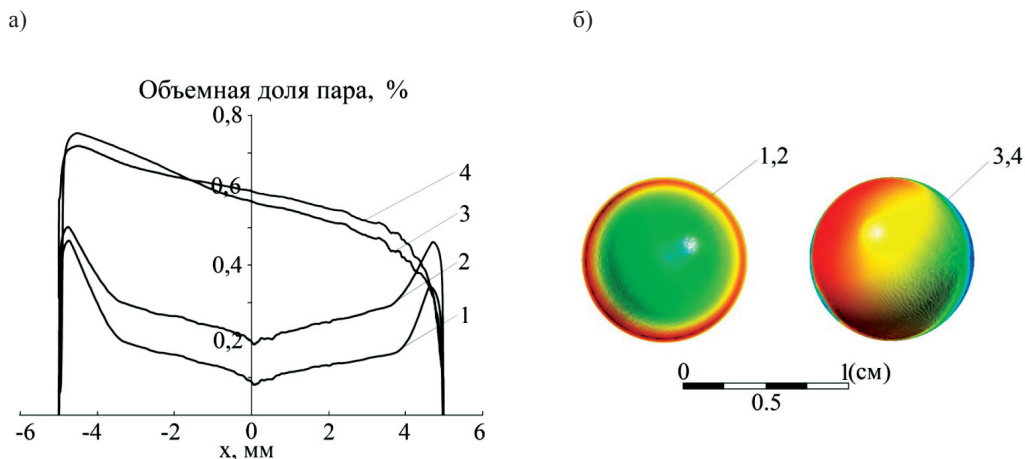


Рис. 4. Объемная доля пара в потоке жидкости в зависимости от координаты x (а) и распределения по поверхности полусферы (б):
1 — перпендикулярное направление — расход $0,2$ кг/с;
2 — расход $0,3$ кг/с (3 и 4, соответственно, под углом 45°)

Наклон струи на 45° от первоначального направления приводит к усилению кавитационного влияния по всей поверхности полусферы (рис. 4, а). Максимум объемной доли пара при этом сдвигается в противоположную сторону от расположения сопла (см. на рис. 4, б обозначено 3, 4)). Концентрация кавитационных пузырьков слабо зависит от массового расхода жидкости в интервале $0,2$ – $0,3$ кг/с, а промежуточные расчеты с шагом $0,01$ кг/с плотно укладывались около линий 3 и 4 на рис. 4, а.

Распределение абсолютного давления p_{abs} при тех же условиях истечения и расположения сопла, что и при анализе объемной доли пара, показано на рис. 5. С учетом того, что противодавление затопленного пространства в модели выбрано равным 200 кПа, во всей области струи возникает разрежение. В местах, где $p_{abs} < p_v$ — давления насыщенного пара, возникает фазовый переход с образованием кавитационных пузырьков. Максимум p_{abs} при перпендикулярном направлении потока находится в центре поверхности полусферы (см. рис. 5, линии 1 и 2), а при угле 45° сдвигается на ее передний край (см. рис. 5 линии 3 и 4)). Рост p_{abs} при увеличении массового расхода от $0,2$ до $0,3$ кг/с шагом $0,01$ кг/с — равномерный. Расстояние от сопла до поверхности полусферы $l = 5$ см. Увеличение расстояния $l = (5\text{--}12)$ см с шагом 1 см от сопла до центра преграды позволило получить следующие результаты, приведенные на рис. 6 и 7. Для перпендикулярного направления потока максимумы объемной доли паровой фазы, наблюдаемые у основания полусферы (см. рис. 4 линии 1, 2), постепенно сглаживаются и для $l = 12$ см проявляются слабо (см. рис. 6, а (линии 1, 2)). Вся поверхность преграды потоку практически равномерно покрыта кавитационными пузырьками с концентрацией $17\text{--}18\%$ (см. рис. 6, б, линия 2).

Изменение расстояния l в том же интервале при наклоне кавитирующей струи на 45° показало изменение формы области паровой фазы на поверхности модели обрастания. Если $l < 9$ см, то формы кривых качественно совпадают (рис. 6, а (линия 3) и рис. 4, а (линии 3, 4)), при $l > 9$ см происходит спад (см. рис. 6 линия 4) паровой фазы на переднем крае полусферы, который усиливается с увеличением l . Изменение зависимости $p_{abs} = f(x)$ при увеличении l носит только количественный характер (рис. 7). Для массового расхода $0,2$ кг/с максимум p_{abs} уменьшается в 4 раза, при этом полное давление на входе в сопло сохраняется $7,6$ атм.

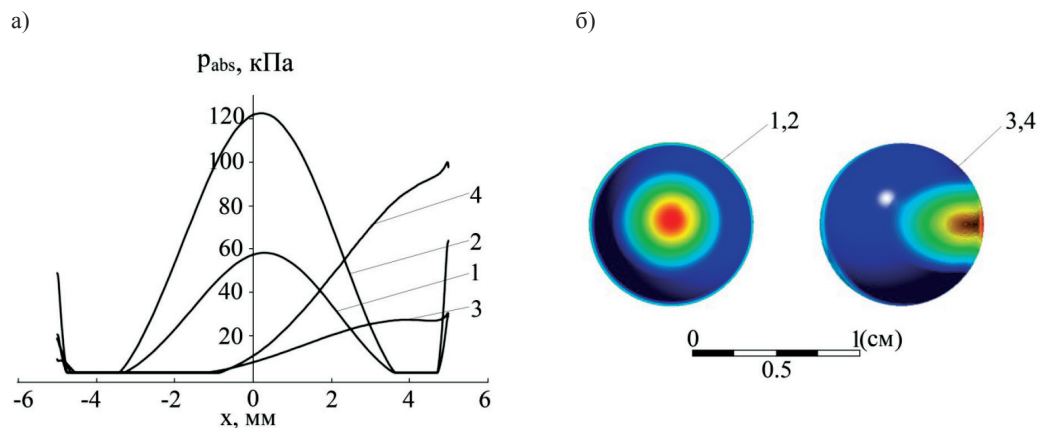


Рис. 5. График абсолютного давления в зависимости от координаты x (а) и его распределение по поверхности полусферы (б);
1 — перпендикулярное направление — расход 0,2 кг/с;
2 — расход 0,3 кг/с (3 и 4 соответственно под углом 45°)

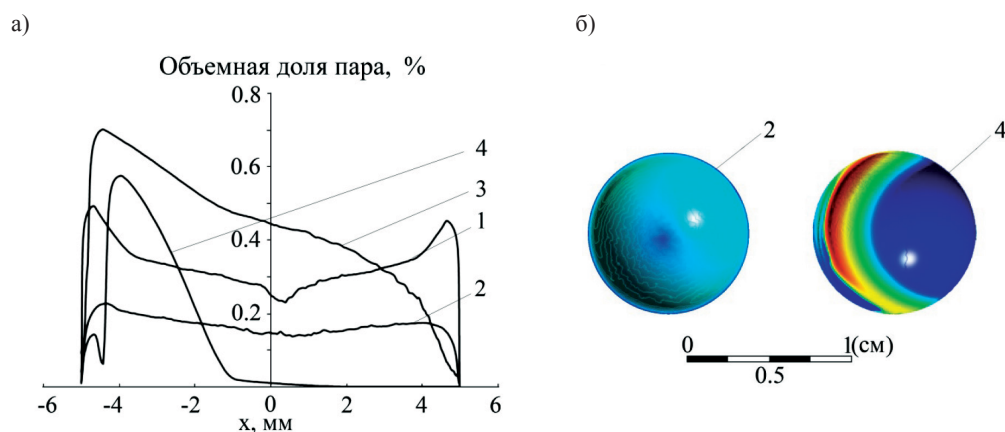


Рис. 6. Объемная доля пара в потоке жидкости в зависимости от координаты x (а) и распределение по поверхности полусферы (б);
1 — перпендикулярное направление — расстояние от сопла до поверхности полусферы 6 см;
2 — расстояние 12 см (3 и 4, соответственно, под углом 45°)

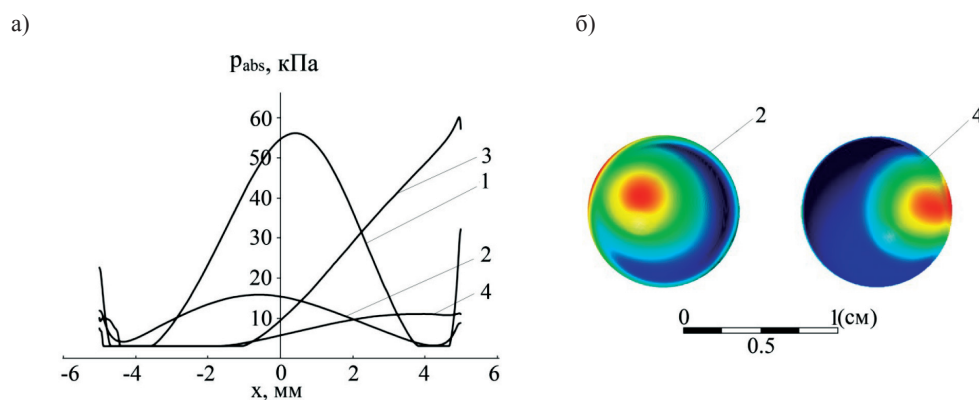


Рис. 7. График абсолютного давления в зависимости от координаты x (а) и его распределение по поверхности полусферы (б);
1 — перпендикулярное направление —
расстояние от сопла до поверхности полусферы 6 см;
2 — расстояние 12 см (3 и 4, соответственно, под углом 45°)

Обсуждение (Discussion)

Объяснить полученные результаты возможно, если подробно рассмотреть структуру кавитирующей струи. Зарождение кавитации происходит в области резкого увеличения скорости потока. Высокоскоростная струя жидкости, распространяющаяся в затопленной области при кавитационных режимах, в отличие от автомодельных струй, не является изобарической. В поперечном сечении струи профиль давлений имеет сложный вид. Образование кавитационных пузырьков происходит на незначительной площади перехода струйного потока из сходящегося участка сопла в расходящийся. Область кавитации в поперечном сечении затопленной струи имеет кольцеобразный вид. Радиусы концентрических окружностей кольца изменяются по всей ее длине. Внутренняя окружность на выходе из сопла имеет размер, соответствующий радиусу основания расходящегося конуса, затем незначительно увеличивается на начальном участке струи и остается постоянной, вплоть до быстрого исчезновения в конце кавитационного «факела». При указанных ранее параметрах диаметр внутренней окружности при моделировании изменялся от 6 мм на срезе сопла, достигал своего максимума (15 мм) и оставался постоянным в средней части струи, затем начинал уменьшаться (5 мм) с приближением к поверхности полусферы.

Внутри окружности по всей длине струи существует спад абсолютного давления по сравнению с противодавлением в затопленном пространстве. Если в данной области выполняется условие $p_{abs} < p_v$, то происходит зарождение кавитационных пузырьков, однако концентрация их будет ниже, чем за пределами внутренней полости. Это подтверждается зависимостями объемной доли пара от координаты x на рис. 4 (линии 1, 2) и рис. 6 (линия 1). Удаление сопла от преграды приводит к дальнейшему уменьшению радиуса внутренней окружности до полного отсутствия различия в сечении струи рис. 6 (линия 2).

Внешняя окружность кольца области кавитации главным образом определяет форму всего кавитационного «факела». Для выбранных параметров истечения ее радиус в средней части струи колебался в пределах 22–25 мм, а объемная доля паровой фазы была не ниже 70 %, что 1,5–2 раза больше, чем внутри струи. Таким образом, тела, размером менее 5 мм, при перпендикулярном воздействии попадали под действие внутренней части кавитирующей струи и испытывали растягивающие напряжения с кавитационным эффектом, который усиливался в основном за пределами полусферы или частично затрагивал ее края.

Сдвиг струи под 45° существенно увеличил объемную долю паровой фазы на поверхности исследуемой модели, поскольку преграда в данном случае попадала в кольцо максимальной кавитации (см. рис. 4 (линии 3 и 4) и рис. 6 (линия 3)). Левее центра полусферы теперь находилась центральная ось струи, а в правую сторону происходил постепенный спад кавитации (см. рис. 4, б (линии 3 и 4)). При увеличении расстояния и сокращении радиуса кольца кавитации ближе к концу струи наблюдалось полное прекращение кавитационного воздействия, так как поверхность образца уходит из-под влияния кавитирующей струи (см. рис. 6, б (линия 4)).

Заключение (Conclusion)

Выполненный эксперимент по обрастанию поверхности судостроительной стали в естественных морских условиях определил основные виды организмов, которые способны прикрепляться в теплых морях в течение выбранного времени испытания. Оценка биомеханических свойств этих обрастаний количественно установила требования к инструменту их разрушения и удаления с поверхности. Использование аппаратов высокого давления подтвердило целесообразность применения комплексного кавитационного и динамического воздействия. Однако сложности в эксплуатации, невысокая рентабельность и безопасность ограничивают этот метод при очистке в открытом море. Дальнейшее развитие кавитационная технология может получить в случае ее реализации при пониженном давлении (≈ 1 МПа). Численное моделирование подобных процессов показало реальную возможность получения хорошо развитой кавитации на поверхности тела обрастания. Только при таких условиях увеличивается зависимость эффективности очистки от длины и ориентации кавитирующей струи, что, в меньшей степени, проявляется при использовании высоких

давлений (>10 МПа). Эта связь, обусловленная внутренней структурой кавитационного потока, должна учитываться при составлении рекомендаций по использованию оборудования для подводной очистки. Однако успешное выполнение указанных требований главным образом зависит от квалификации водолаза и его способности следовать разработанной методике. С другой стороны, использование пониженного давления способствует внедрению малогабаритных устройств и открывает путь к максимальной роботизации процесса, позволяет выполнить переход на погружные насосы или использование мотопомп, снизить массу крепления кавитаторов к поверхности корпуса судна и их соединений с насосной установкой, делает возможным создание автоматических комплексов очистки конструкций под водой.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Звягинцев А. Ю. Морское обрастание в северо-западной части Тихого океана / А. Ю. Звягинцев. — Владивосток: Дальнаука, 2005. — 432 с.
2. Drake J. M. Hull fouling is a risk factor for intercontinental species exchange in aquatic ecosystems / J. M. Drake, D. M. Lodge // *Aquatic Invasions*. — 2007. — Vol. 2. — Is. 2. — Pp. 121–131. DOI: 10.3391/ai.2007.2.2.7.
3. Li Y. Latest research progress of marine microbiological corrosion and bio-fouling, and new approaches of marine anti-corrosion and anti-fouling / Y. Li, C. Ning // *Bioactive materials*. — 2019. — Vol. 4. — Pp. 189–195. DOI: 10.1016/j.bioactmat.2019.04.003.
4. Родионов В. П. Струйная суперкавитационная эрозия / В. П. Родионов. — Краснодар: ГОУВПО КубГТУ, 2005. — 223 с.
5. Родионов В. П. Закономерности кавитационной эрозии конструкционных материалов / В.П. Родионов, А. И. Уколов // *Вестник Дагестанского государственного технического университета. Технические науки*. — 2017. — Т. 44. — № 3. — С. 39–47. DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-3-39-47.
6. Cheng F. Cavitation bubbles dynamics and cavitation erosion in water jet / F. Cheng, W. Ji, C. Qian, J. Xu // *Results in Physics*. — 2018. — Vol. 9. — Pp. 1585–1593. DOI: 10.1016/j.rinp.2018.05.002.
7. Шестоперов В. Ю. Кавитационное разрушение материалов и критерии оценки их эрозионной стойкости / В.Ю. Шестоперов // *Труды НГТУ им. П. Е. Алексеева*. — 2013. — № 5 (102). — С. 79–83.
8. Momber A. W. Short-time cavitation erosion of concrete / A.W. Momber // *Wear*. — 2000. — Vol. 241. — Is. 1. — Pp. 47–52. DOI: 10.1016/S0043-1648(00)00348-3.
9. Уколов А. И. Моделирование дефекта внутренней поверхности струйного кавитатора / А.И. Уколов, В.П. Родионов // *Вестник Донского государственного технического университета*. — 2018. — Т. 18. — № 2. — С. 146–156. DOI: 10.23947/1992-5980-2018-18-2-146-156.
10. Khor Y. S. CFD simulations of the effects of fouling and antifouling / Y.S. Khor, Q. Xiao // *Ocean Engineering*. — 2011. — Vol. 38. — Is. 10. — Pp. 1065–1079. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2011.03.004.
11. Demirel Y. K. Predicting the effect of biofouling on ship resistance using CFD / Y.K. Demirel, O. Turan, A. Incecik // *Applied Ocean Research*. — 2017. — Vol. 62. — Pp. 100–118. DOI: 10.1016/j.apor.2016.12.003.
12. Demirel Y. K. A CFD model for the frictional resistance prediction of antifouling coatings / Y. K. Demirel, M. Khorasanchi, O. Turan, A. Incecik, M. P. Schultz // *Ocean Engineering*. — 2014. — Vol. 89. — Pp. 21–31. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2014.07.017.
13. Owen D. Investigating the effect of biofouling on propeller characteristics using CFD / D. Owen, Y.K. Demirel, E. Oguz, T. Tezdogan, A. Incecik // *Ocean Engineering*. — 2018. — Vol. 159. — Pp. 505–516. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.01.087.
14. Калимуллин Р. Р. Выбор модели турбулентности при моделировании вихревого течения жидкости в теплогенераторе / Р. Р. Калимуллин, Е. М. Яминова, Н. В. Шестерякова // *Гидравлика*. — 2016. — № 1 (1). — С. 60–66.

REFERENCES

1. Zvyagintsev, A. Yu. *Morskoe obrastanie v severo-zapadnoi chasti Tikhogo okeana*. Vladivostok: Dal'nauka, 2005.
2. Drake, John M., and David M. Lodge. "Hull fouling is a risk factor for intercontinental species exchange in aquatic ecosystems." *Aquatic Invasions* 2.2 (2007): 121–131. DOI: 10.3391/ai.2007.2.2.7.

3. Li, Yangfan, and Chengyun Ning. "Latest research progress of marine microbiological corrosion and bio-fouling, and new approaches of marine anti-corrosion and anti-fouling." *Bioactive materials* 4 (2019): 189–195. DOI: 10.1016/j.bioactmat.2019.04.003.
4. Rodionov, V. P. *Struinaya superkavitatsionnaya eroziya*. Krasnodar: GOUVPO KubGTU, 2005.
5. Rodionov, Victor P., and Alexey I. Ukolov. "The laws of cavitation erosion of construction materials." *Herald of Dagestan State Technical University. Technical Sciences* 44.3 (2017): 39–47. DOI: 10.21822/2073-6185-2017-44-3-39-47.
6. Cheng, Feng, Weixi Ji, Chenhao Qian, and Jie Xu. "Cavitation bubbles dynamics and cavitation erosion in water jet." *Results in Physics* 9 (2018): 1585–1593. DOI: 10.1016/j.rinp.2018.05.002
7. Shestoporov, V. Yu. "Cavitation damage of materials and criteria for assessing the erosion resistance." *Trudy Nizhegorodskogo gosudarstvennogo tekhnicheskogo universiteta im. R.E. Alekseeva* 5(102) (2013): 79–83.
8. Momber, Andreas W. "Short-time cavitation erosion of concrete." *Wear* 241.1 (2000): 47–52. DOI: 10.1016/S0043-1648(00)00348-3.
9. Ukolov, Alexey I., and Victor P. Rodionov. "Modeling the inside defect of the jet cavitator." *Vestnik of Don State Technical University* 18.2 (2018): 146–156. DOI: 10.23947/1992-5980-2018-18-2-146-156.
10. Khor, Yee Shin, and Qing Xiao. "CFD simulations of the effects of fouling and antifouling." *Ocean Engineering* 38.10 (2011): 1065–1079. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2011.03.004.
11. Demirel, Yigit Kemal, Osman Turan, and Atilla Incecik. "Predicting the effect of biofouling on ship resistance using CFD." *Applied Ocean Research* 62 (2017): 100–118. DOI: 10.1016/j.apor.2016.12.003.
12. Demirel, Yigit Kemal, Mahdi Khorasanchi, Osman Turan, Atilla Incecik, and Michael P. Schultz. "A CFD model for the frictional resistance prediction of antifouling coatings." *Ocean Engineering* 89 (2014) 21–31. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2014.07.017.
13. Owen, David, Yigit Kemal Demirel, Elif Oguz, Tahsin Tezdogan, and Atilla Incecik. "Investigating the effect of biofouling on propeller characteristics using CFD." *Ocean Engineering* 159 (2018): 505–516. DOI: 10.1016/j.oceaneng.2018.01.087.
14. Kalimullin, R.R., E.M. Yaminova, and N.V. Shesteryakova. "The choice of turbulence model in the simulation of the vortex flow fluid in the heat generator." *Hydraulics* 1(1) (2016) 60–66.

ИНФОРМАЦИЯ ОБ АВТОРАХ

Уколов Алексей Иванович —
кандидат физико-математических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Керченский государственный
морской технологический университет»
298309, Российская Федерация, г. Керчь,
ул. Орджоникидзе, 82
e-mail: ukolov_aleksei@mail.ru

Родионов Виктор Петрович —
доктор технических наук, доцент
ФГБОУ ВО «Керченский государственный
морской технологический университет»
298309, Российская Федерация, г. Керчь,
ул. Орджоникидзе, 82
e-mail: vik-rodio@yandex.ru

INFORMATION ABOUT THE AUTHORS

Ukolov, Aleksey I. —
PhD, associate professor
Kerch State Maritime
Technological University
82 Ordzhonikidze Str., Kerch, 298309,
Russian Federation
e-mail: ukolov_aleksei@mail.ru

Rodionov, Victor P. —
Dr. of Technical Sciences, associate professor
Kerch State Maritime
Technological University
82 Ordzhonikidze Str., Kerch, 298309,
Russian Federation
e-mail: vik-rodio@yandex.ru

Статья поступила в редакцию 29 октября 2019 г.

Received: October 29, 2019.